

ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ

УДК 655.26+004.925.5

РІВНЯННЯ ХРОМАТИЧНИХ КООРДИНАТ КОЛЬОРУ

© Х. Б. Предко, асистент, УАД, М. Р. Крик, асистент,
УАД, М. В. Шовгенюк, д.ф.-м.н., професор, пров.н.с.,
ІФКС НАН України, Львів, Україна

Проанализированы основные свойства цветовых пространств с ахроматичной и двумя хроматическими составляющими цвета. Записано общее уравнение хроматических координат цвета в различных цветовых пространствах. Обоснована возможность ортогонализации хроматической диаграммы и определена универсальная матрица преобразования RGB-координат.

Basic properties of colour spaces with achromatic and two chromatic constituents of color have been analysed. Common equation of chromatic coordinates of color has been written for different colour spaces. The possibility of orthogonalization of chromatic diagram has been grounded and the universal matrix of transformation of RGB-coordinates has been determined.

Постановка проблеми і аналіз попередніх досліджень

На сьогоднішній день відомо багато колірних просторів, які побудовані за різними принципами. Основна вимога до них — досягнути максимально правильного відтворення кольорів відповідно до його сприйняття людським оком.

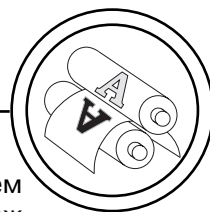
Теорія колірного зору і сьогодні знаходиться в незавершеній стадії розвитку. Проблема полягає в тому, що різні моделі просто описують колір, але не є його теоретичною основою [1], оскільки жодній з них не вдається отримати відповіді на всі питання щодо психофізичного і фізіологічного аспектів зору.

Починаючи з дослідів Ньютона і Максвелла на даний час утвердилися дві основні теорії, що

описують колірний зір людини [2]. У класичній триколірній моделі зору, розробленій Т. Юнгом в 1802 р., стверджується, що існують три компоненти будь-якого відчуття кольору, які є основними складовими адитивної системи: червоний (R), зелений (G) і синій (B). Будь-який колір можна отримувати змішуванням цих трьох кольорів. Згодом теорію Юнга розвинули німецький фізик і фізіолог Г. Гельмгольц і фізик Дж. Максвелл.

Так як фізична теорія Юнга-Гельмгольца не відповідала колірним відчуттям, у 1870 р. німецький фізіолог Е. Герінг сформулював опонентну теорію колірного зору. Він спирався на існування психологічних відчуттів, які діють у парах, а саме: червоного і зеленого, жовтого і синього кольорів, які є проти-

ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ



лежними і не змішуються [1]. Фізіологічна модель Е. Герінга доповнювала відомі на той час результати дослідження та більш повно висвітлювала механізм кольорового зору людини.

У 1933 р. відомий російський вчений М. Ньюберг [2] вперше обґрунтував математичну задачу побудови кольорового тіла, яке базувалося на кольорному зорі людини і стало першим його практичним наближенням. При цьому Ньюберг трактує колір, як вектор в просторі. Представлення кольору за допомогою вектора використав засновник векторного аналізу Грасман, який ввів 8 аксіом, що визначають триколірні рівняння кольорів [3].

Згідно зі сучасними даними на рецепторному рівні світло реєструється трьома різними типами колбочок. Ці рецептори володіють чутливістю до R, G, B частин спектру. Інформація, що поступає від них, перетворюється в імпульсні розряди і закодована інформація посилюється у вигляді сигналу про яскравість зі всіх трьох типів колбочок до опонентно-колірних клітин головного мозку. Розпізнавання кольорів в таких клітинах відбувається саме у вигляді різнице-вих сигналів червоного-зеленого, та жовто-синього кольорів [1].

Значущість перетворення трихроматичних сигналів в опонентні показана в формулюванні всіх моделей кольорового сприйняття. На рис. 1 подана схематична діаграма нейронного «телеграфу», який продукує опонентні відповіді.

Концепція побудови систем кольорового телебачення також заснована на принципі виділення яскравісної (ахроматичної компоненти). В рамках трикомпонентної теорії кольору набір основних складових може бути різним, цим пояснюється велика кількість координатних систем, запропонованих для кількісного описування кольору.

Прикладом опонентної системи є, зокрема, CIE $L^*a^*b^*$. Цей колірний простір є міжнародним стандартом, в якому колір характеризується апаратно незалежними координатами, що є зручно при користуванні в комп'ютерних програмах. В цьому просторі будь-який колір описується світлотою L^* і двома хроматичними компонентами: параметром a^* , який змінюється в діапазоні від зеленого ($a^* < 0$) до червоного ($a^* > 0$), і параметром b^* , що змінюється в діапазоні від синього ($b^* < 0$) до жовтого ($b^* > 0$) кольору. На цьому принципі пізніше були розроблені телевізійні колірні простори YUV і YIQ, простір YCrCb та його аналог Photo YCC, який вибрано за стандарт для цифрових зображень.

На даний час відомо більше 10-ти колірних просторів, розроблених для різних технічних галузей використання кольору.

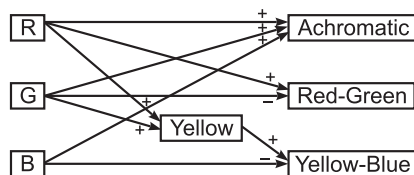
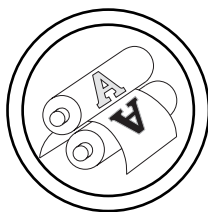


Рис. 1. Схема кодування колбочкових сигналів в опонентні колірні сигнали в зоровій системі людини



ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ

Для поліграфічної галузі використовується лише колірний простір CIE L*a*b*, який не враховує ряд технологічних факторів та особливостей цифрової обробки видавничих оригіналів.

Мета роботи

Метою роботи є аналітичний опис хроматичних діаграм різних колірних просторів з ахроматичною та двома хроматичними складовими кольору, дослідження їх властивостей та обґрунтування можливості розробки нового колірного простору для видавничо-поліграфічної систем цифрової обробки кольорових оригіналів.

Результати проведених досліджень

Розглянемо загальний випадок колірного простору IC₁C₂ у системі базисних векторів I, C₁, C₂, який описується матричним рівнянням:

$$\begin{bmatrix} I \\ C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_R & 1 - (k_R + k_B) & k_B \\ m_{21} & - (m_{21} + m_{23}) & m_{23} \\ m_{31} & - (m_{31} + m_{33}) & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (1)$$

Загальною властивістю лінійного перетворення (1), яке описує практично всі колірні простори, є те, що сума координат ахроматичного вектора I дорівнює 1, а сума координат хроматичних векторів C₁, C₂ дорівнює 0.

На основі рівняння (1) запишемо ахроматичну координату у вигляді розкладу за R, G, B-координатами кольору:

$$I = k_R R + (1 - k_R - k_B) G + k_B B. \quad (2)$$

Для довільної адитивної системи RGB умовою ахроматичності кольору є $R = G = B = C_0$. Тоді на основі (2) незалежно від значень коефіцієнтів k_R , k_B $I = C_0$. Таким чином, з фізичної точки зору в ахроматичній складовій I всі три RGB-координати кольору є рівнозначними.

Проте із врахування фізіології людського зору координата G є визначальною. Тому виділимо цю координату:

$$G = \frac{I - k_R R - k_B B}{1 - k_R - k_B}. \quad (3)$$

В результаті на основі (1) отримуємо загальне матричне рівняння хроматичних координат кольору:

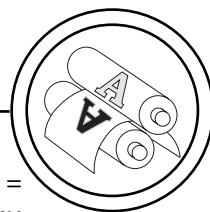
$$\begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} \\ t_{21} & t_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (I - R) \\ (I - B) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

де матриця переходу:

$$\begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} \\ t_{21} & t_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{21} & m_{23} \\ m_{31} & m_{33} \end{bmatrix} \times \frac{1}{(1 - k_R - k_B)} \begin{bmatrix} 1 - k_B & k_B \\ k_R & 1 - k_R \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Таким чином, приходимо до важливого висновку, що хроматичні координати C₁, C₂ довільного колірного простору IC₁C₂ завжди можна представити лінійною комбінацією різницевого координат: (R - I) — «червоний» мінус «нейтрально-сірий» колір; (B - I) — «синій» мінус «нейтрально-сірий» колір. Рівняння (4) пояснює сучасну теорію колірного зору за якою інформація кодується через опонентні сигналами.

ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ



ли у вигляді різницевих сигналів яскравості та R і B кольорів.

Принципова перевага матричного рівняння (4) в тому, що коли задані коефіцієнти t_{ij} матриці (5) і ахроматична координата кольору (2), тоді однозначно отримуємо матрицю [4]:

$$\begin{bmatrix} m_{21} & m_{23} \\ m_{31} & m_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} \\ t_{21} & t_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 - k_R & -k_B \\ -k_R & 1 - k_B \end{bmatrix}, \quad (6)$$

яка дозволяє визначити елементи хроматичних координат C_1 , C_2 матриці (1) кольорного простору IC_1C_2 .

Розглянемо випадки відомих кольорних просторів, які побудовані подібно до того, як сприймає колір око, а саме моделі, в яких ахроматична координата відповідно до Рекомендацій ITU-R BT.601 [5—7] задається рівнянням:

$$Y = 0,299 \cdot R + 0,587 \cdot G + 0,114 \cdot B. \quad (7)$$

Колірна модель YUV заслуговує на увагу, так як використовується в кольоровому телебаченні. Канал Y у моделі YUV визначає яскравість, яка відповідає кривій спектральної чутливості ока, а на екрані чорно-білого телевізора — інтенсивності (яскравості) світла. U, V — кольорні канали, що несуть в собі інформацію про колір [8, 9]. В цьому просторі хроматичні координати кольору визначаються рівнянням:

$$\begin{bmatrix} U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0,493 \\ 0,877 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R - Y \\ B - Y \end{bmatrix} \quad (8)$$

де елементи $t_{12} = 0,493$, $t_{21} = 0,877$ є характерними числами і відповідають стандарту PAL [6]. Тоді на основі формули (6), маємо:

$$\begin{aligned} m_{21} &= -0,493k_R; \\ m_{23} &= 0,493(1 - k_B); \\ m_{31} &= -0,877k_R; \\ m_{33} &= 0,877(1 - k_B). \end{aligned}$$

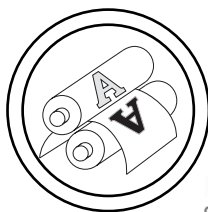
Звідси отримуємо відому [9, 10] матрицю кольорного простору YUV:

$$M_{YUV} = \begin{bmatrix} 0,299 & 0,587 & 0,114 \\ -0,147 & -0,289 & 0,436 \\ 0,615 & -0,515 & -0,100 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Як видно із (8), на хроматичній діаграмі UV вісь U співпадає з лінією різницевих координат (B – Y), а вісь V з лінією різницевих координат (R – Y).

На рис. 2 приведені площини постійних значень ахроматичної координати $Y = \text{const}$. Характерно, що на хроматичній діаграмі UV площини $Y = \text{const}$ розміщені строго по лінії G – M (зелено-пурпурні кольори).

Центральна (середня) $Y = 1/2$ площина кольорів постійної інтенсивності є за формою прямокутником. Зміщені відносно неї площини $Y = 1/2 \pm \Delta Y$ є строго симетричні. При значенні $Y = 0,114$ площина кольорів постійної інтенсивності вироджується в прямокутний трикутник, вершина якого знаходиться в точці В (синій колір). Тоді симетрична площина при значенні $Y = 0,886$ теж має форму прямокутного трикутника з вершиною в точці Y (жовтий колір).



ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ

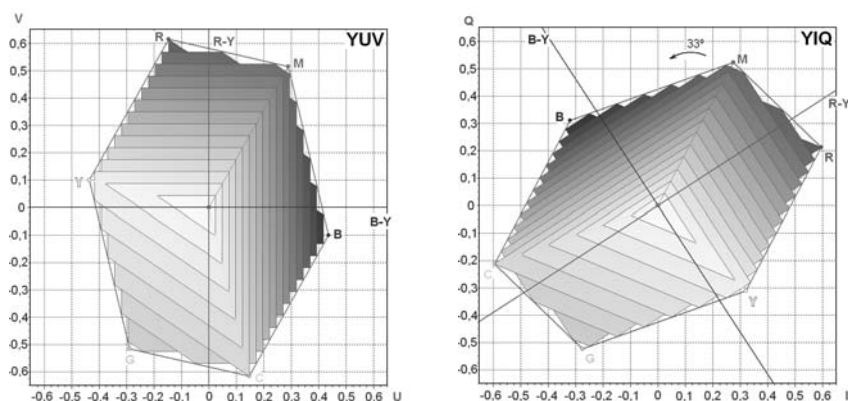


Рис. 2. Площини постійної інтенсивності $Y = \text{const}$ на хроматичних діаграмах кольорних просторів YUV (зліва) і YIQ (справа)

Колірна модель YIQ розроблена в США для кольорового телебачення стандарту NTSC. Методика її описування і основні властивості аналогічні моделі YUV. Відмінність в тому, що хроматичні осі моделі YIQ побудовані в результаті повороту хроматичних осей YUV на кут 33° [10].

$$\begin{bmatrix} I \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos 33^\circ & \sin 33^\circ \\ -\sin 33^\circ & \cos 33^\circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ V \end{bmatrix}, \quad (10)$$

Використовуючи цю формулу, з матриці (9) легко отримуємо матрицю кольорного простору YIQ [10].

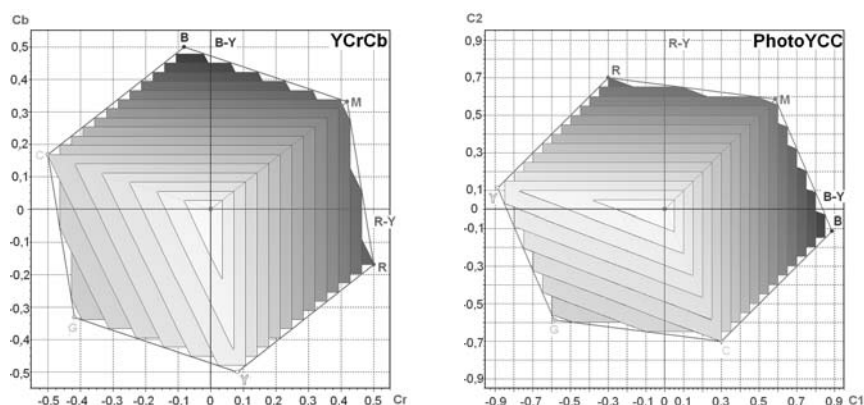
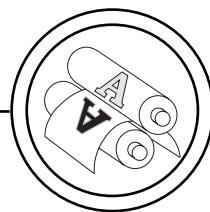


Рис. 3. Площини постійної інтенсивності $Y = \text{const}$ на хроматичних діаграмах кольорних просторів YCrCb (зліва) і Photo YCC (справа)

ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ



$$M_{YIQ} = \begin{bmatrix} 0,299 & 0,587 & 0,114 \\ 0,596 & -0,275 & -0,321 \\ 0,212 & -0,523 & 0,311 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Як видно з рис. 2, в просторі YIQ напрями хроматичних осей не співпадають з напрямками ліній різницевих координат ($R - Y$) і $(B - Y)$.

Колірна модель YCrCb є вдосконаленим варіантом простору YUV. Застосовується в різних алгоритмах вбудовування інформації в зображення, а також в алгоритмах його стискування. В просторі YCrCb хроматичні координати кольору Cr і Cb визначаються рівнянням [11, 12]:

$$\begin{bmatrix} Cr \\ Cb \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2(1 - k_R)} & 0 \\ 0 & \frac{1}{2(1 - k_B)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R - Y \\ B - Y \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Тут діагональна матриця, яка характерними значеннями $t_{11} = 0,564$ і $t_{22} = 0,713$, вибрана на даний час за стандарт відео- та DVD зображень [6, 13].

Використовуючи матриці (8) і (12), отримуємо матрицю переходу від хроматичних координат простору YUV до простору YCrCb:

$$\begin{bmatrix} Cr \\ Cb \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,564/0,493 & 0 \\ 0 & 0,713/0,877 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U \\ V \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Очевидно, що, враховуючи формулу (6) і (12), матриця колірного простору YCrCb

$$M_{YCrCb} = \begin{bmatrix} 0,299 & 0,587 & 0,114 \\ 0,500 & -0,419 & -0,081 \\ -0,169 & -0,331 & 0,500 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

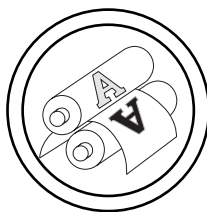
задається виключно координатами (7) ахроматичного вектора Y.

Як видно із рис. 3, на хроматичній діаграмі YCrCb площини постійної інтенсивності ($Y = \text{const}$) подібні аналогічним площинам на діаграмі UV: напрями хроматичних осей Cr і Cb співпадають з напрямками ліній різницевих координат ($R - Y$) і, відповідно, $(B - Y)$. Проте, розташування R, G, В кольорів набуває форми більш правильного шестикутника.

Колірна модель Photo YCC від Eastman Kodak Company була розроблена для кодування зображення на носіях Photo CD. Метою було створення колірного простору, який би не залежав від пристрою відтворення.

Простір Photo YCC побудований на тому ж принципі, що і йому подібні — YUV, YIQ, YCrCb, але він має значно ширше кольорове покриття, яке включає кольори, які знаходяться за межею людського сприйняття. Тому колірний простір Photo YCC розрахований на сучасні технології кольоропередачі і кольоровідтворення цифрового кольорового зображення.

Нехай ахроматична координата задається рівнянням (7). Тоді координати хроматичних векторів матриці (1) знаходимо за допомогою рівняння (5), яке відповідає одиничній матриці $T = E$. В результаті отримуємо матрицю колірного простір Photo YCC:



ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ

$$M_{\text{Photo YCC}} = \begin{bmatrix} 0,299 & 0,587 & 0,114 \\ -0,299 & -0,587 & 0,886 \\ 0,701 & -0,587 & -0,114 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

елементи якої теж визначаються виключно координатами (7) ахроматичного вектора Y .

На рис. 3 приведені площини постійної інтенсивності ($Y = \text{const}$) кольорового простору Photo YCC, які подібні до просторів YUV і YCrCb. Відмінність в тому, що масштаби хроматичних координат $|C_1|$, $|C_2|$ є різні і, відповідно розташування R, G, B-кольорів буде на вершинах деформованого шестикутника.

Таким чином, ми показали, що чотири різні кольорні простори, які характеризуються ахроматичним вектором (7), легко перераховуються на основі матриці $T = [t_{ij}]$ в рівняння хроматичних координат (4) з базового простору YUV.

Для кількісної оцінки кольорів на хроматичній діаграмі принципово важливе значення має ортогональність хроматичних векторів C_1 , C_2 . Досліджені вище кольорні простори YUV, YIQ, YCrCb, Photo YCC відносяться до класу неортогональних, в якому скалярний добуток хроматичних векторів $(C_1, C_2) \neq 0$. Якщо розглядати координати довільно вибраного кольору як координати вектора в кольорному просторі, то для характеристики цього кольору в такій системі необхідно вводити косокутну систему координат.

Покажемо, що кут φ між хроматичними осями C_1 , C_2 на хроматичній діаграмі легко розраховується із загальної матриці простору (1). Якщо виходити із

означення координат (7) ахроматичного вектора Y , то на основі матричного рівняння (6) для довільно вибраної діагональної матриці T знаходимо координати хроматичних осей C_1 , C_2 . Звідси отримуємо:

$$\cos \varphi = \frac{(C_1, C_2)}{|C_1| |C_2|} = 0,0334, \quad (16)$$

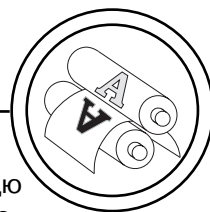
що відповідає куту $\varphi = 88,09^\circ$. Такий кут між хроматичними осями C_1 , C_2 є характерним для всіх кольорних просторів, в яких ахроматична компонента кольору задається рівнянням (7). Таким чином, хроматичні осі C_1 , C_2 хроматичних діаграм досліджених вище кольорних просторів насправді не ортогональні, хоча априорі загально прийнято вважати, що на хроматичній діаграмі C_1 , C_2 осі координат завжди ортогональні. Відхилення від умови ортогональності на кут $\Delta \varphi < 2^\circ$ є не маловажним фактором для кількісної оцінки метричних властивостей різних кольорів на хроматичній діаграмі.

Тепер побудуємо хроматичну діаграму, для якої виконується умова ортогональності хроматичних векторів $(C_1, C_2) = 0$. Розрахунки показують, що для цього випадку для координат ахроматичного вектора повинні виконуватися рівняння:

$$k_B = \frac{3}{4} - \frac{1}{2} k_R - \frac{1}{2} \sqrt{1 + 12 k_R (1 - k_R)}. \quad (17)$$

Будемо вважати, величина k_R змінюється в діапазоні від 0 до

ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ



1/2. На рис. 4 показані графіки для коефіцієнтів k_B , $k_G = 1 - k_R - k_B$ ортогональних просторів, між якими згідно формули (17) є квадратична залежність. Для порівняння точками відмічені числові значення координати Y просторів RGB [14]. Як видно, з усіх відомих просторів RGB саме «телевізійний» простір NTSC RGB найбільш наближений до ортогонального. Звідси приходимо до висновку, що цілком закономірний вибір формули (7) за означення координат ахроматичної компоненти кольору.

Крім побудови хроматичної діаграми ортогонального кольорового простору особливий практичний інтерес представляє випадок одиничних хроматичних векторів $|C_1| = |C_2| = 1$. Тоді координати ахроматичного вектора Y повинні бути рівними:

$$k_R = k_B = \frac{1}{3} \left(1 - \frac{\sqrt{3} - 1}{2} \right) = k_0. \quad (18)$$

Звідси отримуємо матрицю ортогонального кольорового простору:

$$M_{IC,C_2} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \begin{bmatrix} k_0 & 1 - 2k_0 & k_0 \\ 1 + k_0 & -1 & -k_0 \\ -k_0 & -1 & 1 + k_0 \end{bmatrix}. \quad (19)$$

В цьому випадку на хроматичній C_1C_2 -діаграмі базові кольори — $R(1, 0, 0)$, $G(0, 1, 0)$ і $B(0, 0, 1)$ будуть розташовані в одиничному колі, радіуси-вектори яких будуть складати 120° .

Враховуючи властивість радіальної симетрії ортогонального простору положення червоного $R(1, 0, 0)$ кольору може бути в довільній точці на одиничному колі. Для цього використовуємо матрицю повороту хроматичної діаграми C_1C_2 , на кут 60° , так як саме при такому куті відбувається перестановка стовпців матриці (19).

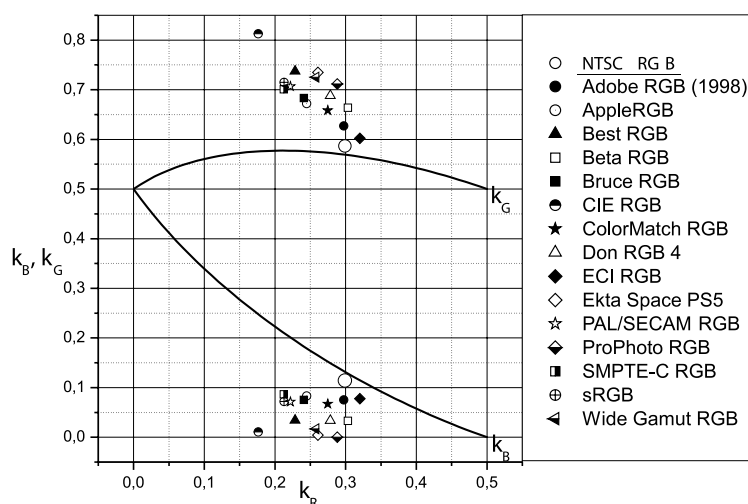
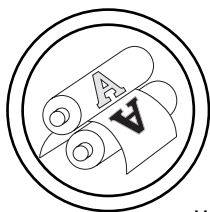


Рис. 4. Залежність коефіцієнтів k_B і k_G від k_R для ортогональних (криві) та неортогональних просторів (точки)



ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ

В такому випадку для класу неортогональних колірних просторів можна отримати єдиний канонічний ортогональний колірний простір.

Очевидно, що для виконання умови (18) симетричного знаходження кольорів на хроматичній діаграмі C_1C_2 при єдиному значенні $m_0 = 1/\sqrt{3}$ елементи першого рядка матриці переходу і першого стовпця оберненої матриці стають однаковими і рівними $1/\sqrt{3}$. Це значення доцільно вибрати за нормуючий множник канонічної матриці нового колірного простору.

В результаті отримано матрицю канонічного представлення колірного простору:

$$\begin{bmatrix} I^* \\ C \\ S \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} k_R & k_G & k_B \\ 1 & H_1 & -H_2 \\ 1 & -H_2 & H_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}, \quad (20)$$

де

$$H_1 = 1 - 3k_0 = 0,366;$$

$$H_2 = 3k_0 - 2 = -1,366, \quad (21)$$

а координати k_R, k_B мають задовольняти рівняння (17) та умову нормування.

Раніше автором [15] вперше було показано, що матриця (20) відповідає матриці дискретного перетворення Хартлі [16] розмірності 3×3 , яку вибрано за означення нового колірного простору ICaS.

Як показано на рис. 5, на хроматичній CaS-діаграмі основні R, G, B і доповнюючі C, M, Y кольори розміщені строго по траєкторії кола.

Таким чином, довільний неортогональний колірний простір завжди зводиться до канонічної форми нового колірного простору ICaS, який є універсальним, має всі властивості відомих ор-

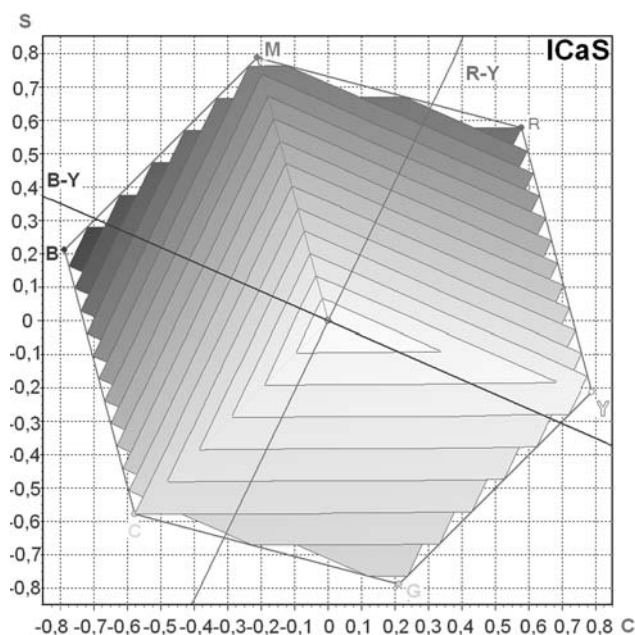
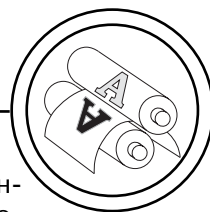


Рис. 5. Площини постійної інтенсивності на хроматичній CaS-діаграмі

ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ



тогональних колірних просторів. Наявність єдиної симетричної матриці (20) з коефіцієнтами H_1 , H_2 суттєво спрощує умови аналізу кольорів на хроматичній діаграмі, що має важливе значення для цифрової обробки кольорових видавничих оригіналів.

Висновки

1. Обґрунтовано необхідність створення колірної моделі з ахроматичною та двома хроматичними координатами, яка б базувалась на принципі зору людини.

2. Записано загальне рівняння хроматичних координат кольору, на основі якого досліджені властивості колірних моделей YUV, YCrCb, YIQ, Photo YCC та визначено їх базові матриці. Здійснено перерахунок між колірними моделями.

3. Доведено, що довільний неортогональний колірний простір можна ортогоналізувати.

4. Встановлено, що при виконанні умови ортогональності рівняння хроматичних координат колірних моделей YUV, YCrCb, YIQ, Photo YCC зводяться до матриці нового колірного простору ICaS.

1. Хьюбел Д. Глаз мозг, зрение / Д. Хьюбел. — М. : Мир, 1990. — 239 с.
2. Нюберг Н. Д. Математические основы задачи построения цветового тела / Приложение к книге Федоров Н. Т. Современное состояние колориметрии, ГТТИ, Москва, 1933. — 192 с.
3. Прэтт У. Цифровая обработка изображений / У. Прэтт. — Т. 1. — М. : Мир, 1982. — 310 с.
4. Гантмахер Ф. Р. Теория матриц / Ф. Р. Гантмахер. — М. : Наука, 1988. — 550 с.
5. ITU-R Rec. BT.601, Studio encoding parameters of digital television for standard 4:3 and wide-screen 16:9 aspect ratios (Geneva: ITU).
6. Рекомендация МСЭ-R BT.1700. Характеристики составных сигналов видео для стандартных аналоговых систем телевидения, 2005.
7. Poynton C. Digital video and HDTV algorithms and interfaces. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2003.
8. Фисенко В. Т. Компьютерная обработка и распознавание изображений : учеб. пособие / В. Т. Фисенко, Т. Ю. Фисенко. — СПб : СПбГУ ИТМО, 2008. — 192 с.
9. Color and Shading: <http://graphics.cs.msu.ru/courses/cg01b/ch6.pdf>.
10. Color Spaces. Chapter 3 [Електронний ресурс]. — Режим доступу : http://compression.ru/download/articles/color_space/ch03.pdf.
11. Montu-far-Chaveznavar R. Face Tracking using a Polling Strategy // Proc. of World Acad. of Scien., Enginner., and Techn. — 2006. — Vol. 18. — P. 161—165.
12. YcrCb to RGB Color-Space Converter v2.0 // DS659, Apr.24.2009 [Електронний ресурс]. — Режим доступу : www.xiling.com.
13. Feruza S. Y. Review on YCrCb color space optimization, TV images compression, Algorithm of Signals Sources Isolation and Optical Fiber / S. Y. Feruza, T. Kim // Int. J. Smart Home. — 2009. — Vol. 3. — No. 4. — P. 43—62.
14. RGB/XYZ Matrices [Електронний ресурс]. — Режим доступу : www.brucelindbloom.com.
15. Шовгенюк М. В. Новый кольоровий простір ICaS на основі перетворення Хартлі / М. В. Шовгенюк // Препринт ІФКС НАН України. — 2009.
16. Брейсуэлл Р. Преобразование Хартли. Теория и приложения / Р. Брейсуэлл. — М. : Мир, 1990.

Рецензент — Н. В. Занько,
к.т.н., асистент, УАД

Надійшла до редакції 05.03.10